"亚洲水塔"变化对下游水资源的连锁效应

汤秋鸿[1,2*]　刘星才[1]　周园园[1]　王　杰[1,2]　运晓博[1,2]

1 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室 北京 100101
2 中国科学院大学 北京 100049

摘要 青藏高原及其周边地区是亚洲大河文明的重要水源地，被称为"亚洲水塔"。"亚洲水塔"变化引起的水资源连锁效应与下游几十亿人民生活和社会发展息息相关，是下游地区实现联合国可持续发展目标的重要影响因素之一。在全球变化背景下，"亚洲水塔"下游流域水资源开发利用强度不断提高，水安全问题日益复杂和突出，"亚洲水塔"变化给下游地区水治理带来新的挑战。"亚洲水塔"变化改变河源区下泄径流，导致冰湖溃决等极端水文事件频发，威胁到下游地区供水安全、防洪安全和生态安全。文章通过分析"亚洲水塔"变化对下游水资源影响及相关研究不足，提出应加强青藏高原环境变化与下游流域水资源研究的结合，发展全流域水循环过程综合集成与模拟技术，阐明流域上下游的关联机制与"亚洲水塔"变化对下游水资源的连锁效应，提出风险应对措施与方案。

关键词 亚洲水塔，青藏高原，下游，水资源，连锁效应

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.013

青藏高原位于亚洲大陆中部，其面积约 240 万平方公里，是世界上海拔最高的高原。黄河、长江、湄公河、恒河、印度河、塔里木河等多条著名亚洲大河均发源于此，因此青藏高原及其周边地区有"亚洲水塔"的美誉。"亚洲水塔"是下游亚洲大河文明的重要水源地。黄河、长江、恒河、印度河等河流在"亚洲水塔"河源区产流量占其流域径流总量最高比例可达 30% 以上[1-3]。在上述大河中，黄河流域承载了中国 9% 的人口和 7% 的国内生产总值；长江流域承载了中国 33% 的人口和 21% 的国内生产总值；恒河流域承载了印度 42% 的人口和 33% 的国内生产总值；印度河流域承载了巴基斯坦 88% 的人口和 92% 的国内生产总值。"亚洲水塔"对流域下游的水资源安全与经济社会发展具有至关重要的意义。

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20060402），第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0208）
修改稿收到日期：2019年10月3日

“亚洲水塔”河流源区广泛分布的冰川、冻土、湖泊是天然的调蓄水库，具有蓄水和调节河川流量的生态服务功能。但是，在气候变化和人类活动影响下，青藏高原环境正发生快速变化，这给“亚洲水塔”水源地保护带来严峻挑战。冰川融水是“亚洲水塔”河流径流补给的重要来源。雅鲁藏布江、怒江、黄河、塔里木河、狮泉河、澜沧江—湄公河、长江等河流源区总径流中都包含了部分冰川融水贡献。气候变暖使得冰川减少与冻土退化，由此导致河川径流变化将顺流向下传播，影响下游地区的供水安全、防洪安全以及生态安全。

“亚洲水塔”变化引起的水资源连锁效应与下游几十亿人民生活和社会发展息息相关，在下游地区实现联合国可持续发展目标过程中可能发挥关键性影响。明确“亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应是核心科学问题，其不仅在地球系统科学研究中具有重要科学意义，同时也是我国国家战略层面的重要科技任务。

1 “亚洲水塔”的下游流域及水资源问题

“亚洲水塔”的下游流域覆盖范围巨大，横跨了东亚、东南亚、南亚、中亚的广大区域（图1）。

黄河流域是中华民族的摇篮，具有悠久的文明历史。近几十年来，随着经济社会的不断发展，黄河流域水资源开发利用强度日益提高，水资源短缺问题严重，生态用水被大量挤占，水生态损害严重，流域上下游之间竞争性用水矛盾突出。

长江流域天然水质良好，是良好的水源和水生生物的理想生境；流域水能资源丰富，可开发的水能资源占全国一半以上。近年来，随着大规模的水电开发和工农业生产的迅速发展，长江流域水污染问题严重，水生生物多样性面临严峻的挑战。

澜沧江出境后被称为湄公河，流经老挝、缅甸、泰国、柬埔寨和越南，最终流入我国南海，是亚洲

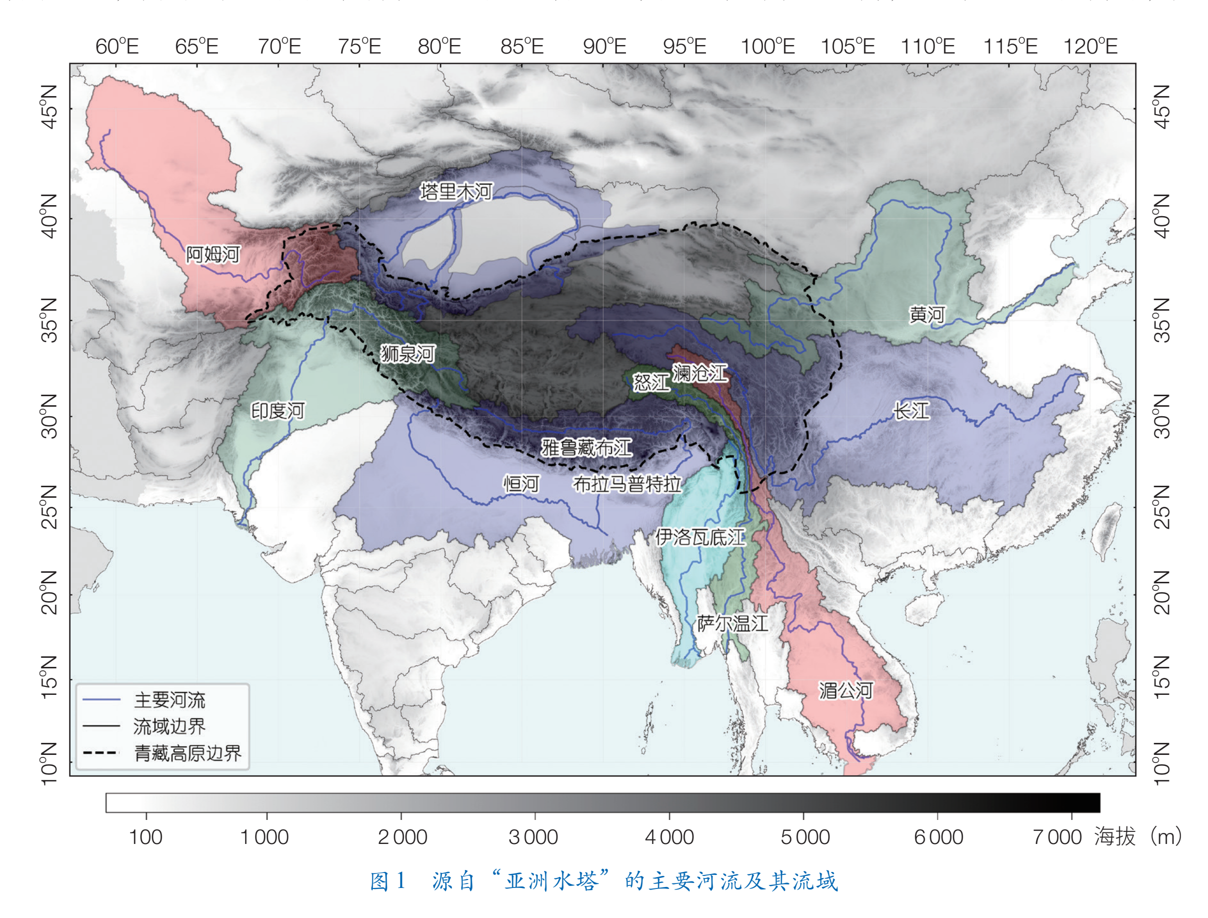


图1 源自“亚洲水塔”的主要河流及其流域

重要的跨国河流。澜沧江—湄公河水能和渔业资源丰富，位于下游的湄公河三角洲是世界著名的水稻产区。尽管澜沧江—湄公河流域水资源丰富，但是降水季节分布极不均匀，有明显的雨季和旱季，旱涝灾害频发。

怒江流入缅甸后称为萨尔温江，最终注入印度洋。怒江—萨尔温江流域保存了众多少数民族文化和珍贵的水生生物资源。尽管怒江水能资源丰富，但是目前水电开发还比较少；萨尔温江下游污染严重，被列为世界十大污染河流之一。

雅鲁藏布江流经藏南地区后进入印度，被称为布拉马普特拉河，流入孟加拉国后称为贾木纳河，与恒河相汇后流入孟加拉湾。布拉马普特拉—恒河流域大部分在印度，布拉马普特拉流域以农业为主；恒河流域居住了大概4亿人口，土地肥沃，以农业和渔业为主，污染严重；恒河三角洲大部分在孟加拉国，易发洪灾，居住了1亿多人口，以农业为主。

在全球变化背景下，“亚洲水塔”下游流域水资源开发利用强度不断提高，水安全问题日益复杂和突出，而“亚洲水塔”变化将给下游地区水治理带来新的挑战。尽管“亚洲水塔”下游地区关注的水安全问题各有侧重，但是水资源与气候变化影响、旱涝灾害、水生态与水环境、风暴潮和泥石流灾害等是焦点问题。气候变化导致部分地区降水强度增加，从而使得下游河流洪水频率增加，甚至引发水库溃坝等次生灾害[4,5]。随着社会经济发展，下游流域的水资源开发利用需求逐步加大，不同国家/区域之间、不同部门之间用水竞争明显增加。在一些农业灌溉等人类用水活动剧烈的流域，上游用水可能加重下游水文干旱事件[6]。

2 “亚洲水塔”变化的下游水资源影响传播机制

*“亚洲水塔”变化对下游水资源的直接影响主要体现在河源区下泻径流量及其季节分布，从而影响下游流域的水文过程和水资源量。*气温上升通常会导致冰雪融化时间提前，从而改变下游水文过程的季节特征。随着全球气候变暖，冰川流域的春季径流增加甚至引发洪水，但夏季径流可能减少，从而影响夏季供水量。短期来看，气候变化可能会增加冰雪融水，增加下游径流量；但长期而言将导致冰川退缩，减少下游供水量，引发干旱和供水危机[7]。“亚洲水塔”下泻径流形成的洪水脉冲给下游湖泊和洪泛平原带来肥沃的有机质，给河口三角洲地区带来泥沙补给，是维持下游土壤肥力和渔业资源的关键因素。因此，“亚洲水塔”河源区下泻径流变化还可能影响到下游农业和渔业生产。

*由于人类活动的影响，“亚洲水塔”变化对下游水资源的影响更为复杂。*冰川融水是一些河流下游区域农业灌溉的重要水源。例如，印度河和恒河下游对“亚洲水塔”河流源区水资源存在较大程度上的依赖。印度河、恒河和布拉马普特拉河流域的灌溉用水占总用水量的91%。随着人口增长和灌溉农业扩张，上述3条河流的下游灌溉用水需求将不可避免地大幅增加[8]，这将导致水资源压力突显，对“亚洲水塔”变化尤其敏感。澜沧江—湄公河流域旱季灌溉需水明显高于雨季，尽管流域水资源丰富，但是旱季灌溉用水缺口较大，对上游来水量的依赖程度很高[9]。气温上升导致“亚洲水塔”冰川冻土退化，可能使得多条河流夏季径流减少，从而影响农业灌溉可用水量[10]。

*“亚洲水塔”下游地区人口密集，能源需求非常大，因此“亚洲水塔”河流往往也是支撑下游地区社会和经济发展的重要能源来源。*大部分“亚洲水塔”河流已经修建或者正在规划建设大量的大坝用于水力发电[11]，“亚洲水塔”变化将对水力发电产生重要影响。以黄河为例，上游河流源区对黄河中下游供水影响较大，需要同时满足防洪排涝、农业灌溉用水、河道整治等多方面需求，因此河流源区径流变化对流域

水力发电潜力有显著影响[12,13]。"亚洲水塔"河流上修建的大坝除了发电功能之外，本身还具备防洪和径流调节等作用，可以减轻下游洪水和干旱风险[14]。气候变化下"亚洲水塔"河流源区径流变化与大坝等人类活动共同改变下游的洪水脉冲、泥沙补给、供水和地下水开采需求，从而对下游河道和河口三角洲的生态与环境产生影响。

3 "亚洲水塔"变化带来的下游水资源风险

3.1 "亚洲水塔"变化带来的下游水资源风险凸显

近几十年来，在气候变暖的影响下，"亚洲水塔"的冰川呈加速融化趋势。冰川融水变化导致下游河流径流量年内分配发生变化，增加了汛期洪涝灾害的风险，同时导致干旱季水量不足，甚至缺水干涸。冰川融水形成的洪峰多出现在每年 7—8 月，同时也是下游河流的汛期。降水形成的径流洪峰与冰川融水径流洪峰季叠加，使下游的河流水量在短期内明显增加，容易引发洪涝灾害。

随着气候变暖，春季冰川融水径流的洪峰提前，秋季融水补给季节延长，容易导致冰碛湖溃决引起洪灾。例如，2003—2009 年喜马拉雅冰川融化产生了约 1 740 亿吨的水，导致印度河、恒河和雅鲁藏布江—布拉马普特拉河发生灾难性洪水[15]。19 世纪 50 年代，西藏自治区桑旺湖曾发生冰崩引发的溃决洪水，造成了巨大的灾害；溃决洪水冲淹了江孜和日喀则两大城镇，灾害性影响波及 180 公里之外的雅鲁藏布江[16]。相关模拟研究表明，该区域若发生冰湖溃决可形成万年一遇的洪水，增加大坝溃决、城镇淹没的风险[17]。

3.2 未来风险变化趋势

全球气候变暖导致冰川大面积退缩，将严重影响下游水资源的稳定性。在短期内，下游河流未来主要的风险是冰雪融水增加导致的洪水灾害。例如，气温上升将导致印度河、布拉马普特拉河流域冰川融水增加，从而使得下游洪水风险上升[18]。长期来看，随着全球气候变暖，冰川不断萎缩，冰川融水对河流的补给将逐渐减少，下游河流有干旱化趋势甚至变成季节性河流的风险。根据全球气候模式情景预估结果，2050 年青藏高原冰川退缩或将导致印度河径流减少 8.4%，恒河径流减少 17.6%，雅鲁藏布江径流减少 19.6%，长江径流减少 5.2%[19]。"亚洲水塔"河流源区下泻流量的变化可能给下游地区农业生产、水力发电、涉水灾害等方面带来多重风险[12,13,18]。

4 应对"亚洲水塔"变化的全流域可持续水管理

4.1 应对"亚洲水塔"变化需要关注的重大科学问题

"亚洲水塔"河流源区受人类活动的直接影响相对较小，但是对气候变化非常敏感。"亚洲水塔"变化的影响通过河流源区径流变化向下游传播，从而给下游地区带来风险。全球变化背景下，"亚洲水塔"下游地区本身面临水资源需求增加和本地气候变化影响的问题，而"亚洲水塔"变化对下游水资源的连锁效应带来了新的挑战。

为了更好地理解青藏高原环境变化的影响，支撑下游地区可持续水资源管理，需要关注 4 个方面的重大科学问题：① *青藏高原环境变化与下游流域水文过程的关联机制*。青藏高原环境变化与下游流域水文过程存在复杂的相互作用，深入理解流域上、下游水文过程变化机理及其关联机制是定量评估亚洲水塔变化对下游水资源连锁效应的科学基础。② *"亚洲水塔"变化对下游地区水资源风险的叠加效应*。全球变化背景下，下游水资源风险是多种因素的叠加作用结果，亟待定量区分下游地区自身与上游变化引起的风险，阐明风险传播机制与叠加效应。③ *"亚洲水塔"水源地变化对下游水资源的影响预估及其不确定性*。目前水文模型对"亚洲水塔"变化下游影响的模拟能力还不足，预估的不确定性非常大，提高水文模型的模拟和预测预估能力，减少未来预估的不确定性，是重要

的关键科学问题之一。④"亚洲水塔"变化背景下流域水资源系统恢复力。未来"亚洲水塔"变化极有可能对下游地区水资源系统产生显著影响，如增加水资源风险，影响到下游的供水安全、防洪安全和生态安全。面对"亚洲水塔"变化影响的不确定性，通过研究流域下游水资源系统恢复力，以期主动应对风险，尽可能地减少"亚洲水塔"变化带来的不利影响。

4.2 未来需要开展的研究工作

围绕上述重大科学问题，未来需要从 3 个方面开展工作：① 探索青藏高原环境变化与下游流域水文过程相互作用，揭示流域上下游之间的关联机制，阐明"亚洲水塔"变化对下游地区水系统的影响；② 发展全流域水循环过程综合集成模型，开展从高寒山区到河口三角洲的全流域水文过程高精细模拟，预估"亚洲水塔"水源地变化对下游水资源的影响；③ 评估"亚洲水塔"变化背景下流域水资源风险，编制风险图集与风险区划，发展气候变化背景下流域水资源系统恢复力建设的框架。

5 结语

"亚洲水塔"是亚洲大河文明重要的水源地，气候变暖背景下"亚洲水塔"的水文过程（如冰川融水、冻土融解）变化直接影响河流源区的下泻流量，对高度依赖上游供水的河流可谓牵一发而动全身，给下游地区带来洪水或干旱风险，威胁到下游的供水安全、防洪安全和生态安全。

全球变化背景下，"亚洲水塔"下游本身的水资源问题日益复杂和突出，"亚洲水塔"变化可能给下游地区水治理带来新的挑战。面对下游水资源问题和水治理挑战，应加强青藏高原环境变化与下游流域水资源研究的结合，发展全流域水循环过程综合集成与模拟技术，阐明流域上下游的关联机制与"亚洲水塔"变化对下游水资源的连锁效应，提出风险应对措施与方案。

参考文献

1 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. 科学通报, 2019, 64(27): 2807-2821.

2 陈亚宁, 叶朝霞, 毛晓辉, 等. 新疆塔里木河断流趋势分析与减缓对策. 干旱区地理, 2009, 32(6): 813-820.

3 胡文俊, 杨建基, 黄河清. 印度河流域水资源开发利用国际合作与纠纷处理的经验及启示. 资源科学, 2010, 32(10): 1918-1925.

4 Gu H, Yu Z, Wang G, et al. Impact of climate change on hydrological extremes in the Yangtze River Basin, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(3): 693-707.

5 徐泽平. 老挝桑片-桑南内水电站溃坝事件初步分析与思考. 水利水电快报, 2018, 39(8): 8-12.

6 黄忠伟, 穆梦斐, 刘星才, 等. 人类用水活动对大尺度陆地水循环的影响. 地球科学进展, 2015, 30(10): 1091-1099.

7 姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响. 自然杂志, 2010, 32(1): 4-8.

8 Wijngaard R R, Biemans H, Lutz A F, et al. Climate change vs. socio-economic development: Understanding the future South-Asian water gap. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22: 1-36.

9 Tatsumi K, Yamashiki Y. Effect of irrigation water withdrawals on water and energy balance in the Mekong River Basin using an improved VIC land surface model with fewer calibration parameters. Agricultural Water Management, 2015, 159: 92-106.

10 Zhao Q, Ding Y, Wang J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow. Journal of Hydrology, 2019, 573: 60-81.

11 King P, Bird J, Haas L. The current status of environmental criteria for hydropower development in the Mekong region:

A literature compilation. Vientiane: WWF–Living Mekong Programme, 2007: 171.
12 Yin Y, Tang Q, Liu X, et al. Water scarcity under various socio-economic pathways and its potential effects on food production in the Yellow River basin. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(2): 791-804.
13 Liu X, Tang Q, Voisin N, et al. Projected impacts of climate change on hydropower potential in China. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 20(8): 3343-3359.
14 Wang W, Lu H, Leung L R, et al. Dam construction in Lancang-Mekong River basin could mitigate future flood risk from warming-induced intensified rainfall. Geophysical Research Letters, 2017, 44: 10378-10386.
15 Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. Science, 2013, 340(6134): 852-857.
16 徐道明, 冯清华. 冰川泥石流与冰湖溃决灾害研究. 冰川冻土, 1988, 10(3): 284-289.
17 冉启华, 吴秀山, 贺治国, 等. 冰湖溃决模式对下游洪水过程的影响. 清华大学学报（自然科学版）, 2014, 54(8): 1049-1056.
18 Nepal S, Shrestha A B. Impact of climate change on the hydrological regime of the Indus, Ganges and Brahmaputra river basins: a review of the literature. International Journal of Water Resources Development, 2015, 31(2): 201-218.
19 Jain C K. A hydro-chemical study of a mountainous watershed: The Ganga, India. Water Research, 2002, 36(5): 1262-1274.

Cascading Impacts of Asian Water Tower Change on Downstream Water Systems

TANG Qiuhong[1,2*] LIU Xingcai[1] ZHOU Yuanyuan[1] WANG Jie[1,2] YUN Xiaobo[1,2]

（1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract The "Asian Water Tower (AWT)" is an important water source for downstream Asian countries. The cascading impacts on water resources caused by changes of the AWT are closely associated with the water security for billions of people downstream. The changes of the AWT plays a key role in achieving the sustainable development goals in the downstream regions set by the United Nation General Assembly. In the context of global change, the intensity of water resources development and utilization in downstream rivers has continuously increased, and water resource issues have risen in prominence. The changes of the AWT have brought new challenges to water management in the downstream regions. Environmental changes of the AWT have caused extreme events such as the abrupt changes of discharge from the AWT and glacial lake outbursts, resulted in water supply and floods risks in downstream river basins, affected water supply, flood control, and water environment in the downstream regions. By analyzing the impact of changes of the AWT on the downstream systems and the related research gap, suggestions are made to strengthen integrated study of environmental change of the AWT and water security in the downstream, to advance integrated watershed modeling techniques for the whole basins, and to explore the linkages between the upstream alpine area and downstream water systems. There is an urgent need to understand the

* Corresponding author

cascading impacts of the AWT change on downstream water systems, and to cope with the impacts of the AWT change.

Keywords Asian Water Tower, Tibetan Plateau, downstream, water resources, cascading impacts



汤秋鸿　中国科学院地理科学与资源研究所研究员，中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室主任。主要从事全球变化水文学、水文气象、陆面水文模型、遥感水文等方面的研究。E-mail: tangqh@igsnrr.ac.cn

TANG Qiuhong Professor at the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Director of the CAS Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes. His research focuses on global change hydrology, hydrometeorology, land surface hydrological model, and remote sensing hydrology. E-mail: tangqh@ignsrr.ac.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. 科学通报, 2019, 64(27): 2807-2821.
Tang Q H, Lan C, Su F G, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2807-2821. (in Chinese)

2 陈亚宁, 叶朝霞, 毛晓辉, 等. 新疆塔里木河断流趋势分析与减缓对策. 干旱区地理, 2009, 32(6): 813-820.
Chen Y N, Ye Z X, Mao X H, et al. Dried-up trend of Tarim River and the countermeasures for mitigation. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 813-820. (in Chinese)

3 胡文俊, 杨建基, 黄河清. 印度河流域水资源开发利用国际合作与纠纷处理的经验及启示. 资源科学, 2010, 32(10): 1918-1925.
Hu W J, Yang J J, Huang H Q. Lessons and inspirations from international cooperation and dispute resolution on water resources development in the Indus River Basin. Resources Science, 2010, 32(10): 1918-1925. (in Chinese)

4 Gu H H, Yu Z B, Wang G L, et al. Impact of climate change on hydrological extremes in the Yangtze River Basin, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(3): 693-707.

5 徐泽平. 老挝桑片-桑南内水电站溃坝事件初步分析与思考. 水利水电快报, 2018, 39(8): 6-10.
Xu Z P. Preliminary analysis and thinking of dam burst event of XePian-XeNamnoy hydropower station in Laos. Express Water Resources & Hydropower Information, 2018, 39(8): 6-10. (in Chinese)

6 汤秋鸿, 黄忠伟, 刘星才, 等. 人类用水活动对大尺度陆地水循环的影响. 地球科学进展, 2015, 30(10): 1091-1099.
Tang Q H, Huang Z W, Liu X C, et al. Impacts of human water use on the large-scale terrestrial water cycle. Advances in Earth Science, 2015, 30(10): 1091-1099. (in Chinese)

7 姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响. 自然杂志, 2010, 32(1): 4-8.
Yao T D, Yao Z J. Impacts of glacial retreat on runoff on Tibetan Plateau. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(1): 4-8. (in Chinese)

8 Wijngaard R R, Biemans H, Lutz A F, et al. Climate change vs. socio-economic development: Understanding the future South-Asian water gap. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(12): 6297-6321.

9 Tatsumi K, Yamashiki Y. Effect of irrigation water withdrawals on water and energy balance in the Mekong River Basin using an improved VIC land surface model with fewer calibration parameters. Agricultural Water Management, 2015, 159: 92-106.

10 Zhao Q D, Ding Y J, Wang J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow. Journal of Hydrology, 2019, 573: 60-81.

11 King P, Bird J, Haas L. The Current status of environmental criteria for hydropower development in the Mekong region: A literature compilation. Vientiane: WWF–Living Mekong Programme, 2007: 171.

12 Yin Y Y, Tang Q H, Liu X C, et al. Water scarcity under various socio-economic pathways and its potential effects on food production in the Yellow River basin. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(2): 791-804.

13 Liu X C, Tang Q H, Voisin N, et al. Projected impacts of climate change on hydropower potential in China. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(8): 3343-3359.

14 Wang W, Lu H, Leung L R, et al. Dam construction in Lancang-Mekong river basin could mitigate future flood risk from warming-induced intensified rainfall. Geophysical Research Letters, 2017, 44(20): 10378-10386.

15 Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, et al. A reconciled

estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. Science, 2013, 340(6134): 852-857.

16 徐道明, 冯清华. 冰川泥石流与冰湖溃决灾害研究. 冰川冻土, 1988, 10(3): 284-289.

Xu D M, Feng Q H. Research on glacial debris flow and glacial lake outburst disaster. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(3): 284-289. (in Chinese)

17 冉启华, 吴秀山, 贺治国, 等. 冰湖溃决模式对下游洪水过程的影响. 清华大学学报（自然科学版）, 2014, 54(8): 1049-1056.

Ran Q H, Wu X S, He Z G, et al. Impact of glacial lake breach mechanism on downstream flood progress. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(8): 1049-1056. (in Chinese)

18 Nepal S, Shrestha A B. Impact of climate change on the hydrological regime of the Indus, Ganges and Brahmaputra River basins: A review of the literature. International Journal of Water Resources Development, 2015, 31(2): 201-218.

19 Jain C K. A hydro-chemical study of a mountainous watershed: The Ganga, India. Water Research, 2002, 36(5): 1262-1274.